

Modelo Simulink en sfunction de un sistema fotovoltaico compuesto por un simulador de sol, panel y conversor

Óscar Sánchez Rodríguez

Datos autor;

Resumen

El objetivo del presente proyecto es la simulación de un sistema fotovoltaico completo, compuesto por un panel, un convertidor, un inversor, nuestra vivienda y la red eléctrica. Para ello se utilizará un panel comercial con unas características determinadas, durante las horas solares de un día concreto del año. Teniendo en cuenta el mes, el estado del cielo, la situación geográfica del panel fotovoltaico, su inclinación, el azimut respecto al sud, si la placa tiene seguimiento o no del movimiento solar, a cuantos ejes en el caso de que los tenga y el incremento de tiempo en el que se actualiza la posición de la misma.

Teniendo en cuenta todas estas características podremos evaluar las diferencias que existen entre un panel convencional y otro con control del seguimiento del Punto de Máxima Potencia, y dentro de los que poseen este tipo de control podremos analizar que seguimiento es más efectivo, si a uno o dos ejes.

Una vez ya tenemos nuestra señal en corriente alterna en la salida del inversor, tan solo debemos conectarla a nuestra vivienda y seguidamente a la red eléctrica. De esta forma durante el día nuestros paneles solares se encargarán de proporcionar la energía para ser consumida por nuestras cargas domésticas, vendiendo a Fecsa nuestra energía sobrante. Y durante la noche será la propia red eléctrica de Fecsa la que nos proporcionará la energía para nuestro hogar.

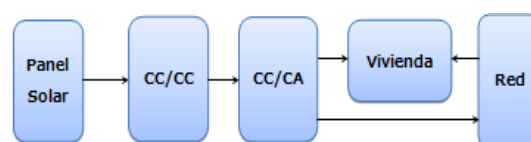


Fig. 1. Esquema instalación para producción de energía solar en vivienda

1. Introducción

En la figura 1 podemos ver la disposición de cada uno de los elementos que conforman el circuito, de una forma muy general. En primer lugar tenemos el modulo con paneles fotovoltaicos que será el encargado de a través de la luz solar, proporcionar la potencia necesaria para autoabastecernos. Por si solos, los paneles fotovoltaicos no son capaces de producir la tensión suficiente para poder conectar el sistema a los 311V de red alterna comercial. Es por esta razón que a la salida del módulo se disponga de un Convertidor Boost, que es capaz de elevar la tensión que los paneles aportan. Además permite acoplar un controlador del MPP para así convertir el sistema fotovoltaico en uno más eficiente.

Una vez obtenemos una tensión de continua elevada a la salida del convertidor, superior a 311V, deberemos procesarla a través de un inversor para convertirla de DC a AC y de esta forma poder inyectarla a red a unos 311V eficaces. Al igual que en el convertidor, el inversor también dispone de su propio control para poder diseñar el modulado de la señal de salida.

2. Conceptos previos

Antes de entrar en materia, explicaremos algunos conceptos de astronomía que serán esenciales para más tarde entender la formulación matemática sobre la que nos hemos basado para elaborar los algoritmos de control y funciones.

Sistema de coordenadas horizontal

Ángulo de azimut (γ): Es el ángulo que hay entre el plano de la normal de la superficie del punto que calculamos y el meridiano del lugar, se toma como origen el Sud, siendo el Oeste negativo y el Este positivo.

Altura solar (h): Es el ángulo formado entre los rayos que unen el Sol y el plano de la superficie perpendicularmente.

Sistema de coordenadas ecuatorial

Ángulo horario (ω): Es el ángulo resultante de dividir 360° entre las 24 horas que tarda la Tierra en girar sobre sí misma, lo que nos da 15° cada hora. Tomando como

origen el mediodía solar siendo las mañanas positivas y las tardes negativas:

$$\omega = 15(12 - \text{hora})$$

Latitud (L): Es el ángulo que forma la vertical del punto estudiado con el plano del ecuador. Su valor oscila entre 0° y 90°, siendo el hemisferio Norte positivo y el hemisferio Sud negativo. Por ejemplo, las latitudes de algunas ciudades son:

Barcelona	41° 23'
Vilanova i la Geltrú	41° 13'
Madrid	40° 26'
Menorca	39° 48'
Sevilla	37° 22'

Declinación solar (δ): Es la posición angular del Sol respecto el plano del ecuador medida al mediodía solar. La declinación puede obtenerse mediante la fórmula de Cooper, y a continuación se puede observar una ecuación aproximada bastante precisa:

$$\delta = 23,45 \cdot \sin\left(360 \cdot \frac{284 + n}{365}\right)$$

δ : Declinación solar

n: Día del año, a partir de 1 e incrementando unitariamente

Ángulo de inclinación (β): Es el ángulo que existe entre el plano de la superficie estudiada (por ejemplo un panel solar) y la horizontal.

3. Panel fotovoltaico

En este apartado se modela y simula un panel comercial convencional cualquiera, que será el utilizado en nuestro sistema fotovoltaico. Veremos la aproximación que se consigue al modelo real y como se comporta respecto a variaciones en el medio ambiente impuestas por nosotros mismos.

Modelo equivalente

El modelo seleccionado para la simulación del panel fotovoltaico es el propuesto por Ortiz en su tesis de doctorado en la Universidad de Michigan "Modeling and Analysis of Solar Distributed Generation" (Ortiz, 2006), (Gil, 2008).

Los parámetros son obtenidos de la hoja de datos del dispositivo que se desee modelar. Con este modelo se puede representar el panel FV, para valores dinámicos de radiación y temperatura. La ecuación propuesta en Gil

(2008) para representar la relación I-V del panel FV es la siguiente:

$$I_v = \left(\frac{I_x}{1 - \exp\left(-\frac{1}{b}\right)} \right) * \left(1 - \exp\left(\left(\frac{V_{oc}}{b * V_x}\right) - \left(\frac{1}{b}\right)\right) \right)$$

Donde V_x e I_x son los voltajes de circuito abierto y corriente de cortocircuito para valores de irradiación y temperaturas dinámicos y están definidos por:

$$V_x = s \frac{E_i}{E_{in}} TC_v * T - T_n + s V_{max} - s (V_{max} - V_{min}) * \exp\left(\frac{E_i}{E_{in}} \log\left(V_{max} - \frac{V_{oc}}{V_{max}} - V_{min}\right)\right)$$

$$I_x = p \frac{E_i}{E_{in}} * (I_{sc} + TC_i * (T - T_n))$$

Donde:

s: representa el número de paneles en serie.

p: número de paneles en paralelo.

b: es la constante característica del panel.

E_i : irradiación efectiva a la que opera el panel

E_{in} : constante de irradiación de 1000 W/m².

T: es la temperatura a la que opera el panel.

T_n : es una constante de temperatura de 25°C.

V_{oc} : es el voltaje de circuito abierto.

I_{sc} : es la corriente de cortocircuito.

V_{max} , V_{min} : son los valores de voltaje de circuito abierto para niveles de irradiación menores a 200 W/m² y mayores a 1200 W/m² con una temperatura de operación de 25°C. Estos valores rondan el 85% de V_{oc} para V_{min} y el 103% de V_{oc} para el caso de V_{max} .

TC_i : coeficiente de temperatura de corriente.

TC_v : coeficiente de temperatura de voltaje.

En la siguiente figura se puede observar el esquema en Simulink del modelo equivalente de Ortiz y Gil.

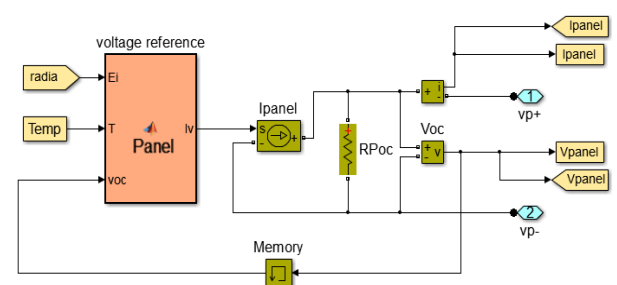


Fig. 2. Modelado panel fotovoltaico

En las siguientes gráficas podemos comprobar la respuesta del panel simulado:

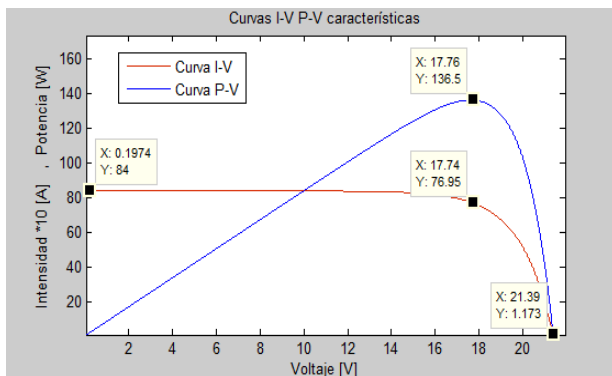


Fig. 3. Curvas características del Panel Fotovoltaico

Como podemos ver, nuestro modelo matemático elegido ha sido capaz de recrear las características del panel comercial con buena precisión, dentro del margen del $\pm 3\%$ de error estipulado por el fabricante.

Por tanto, a la vista de los resultados de simulación, podemos afirmar que nuestro modelo cumple con el comportamiento real de un panel fotovoltaico.

Parámetro	Valor teórico	Valor simulado	Error relativo
Corriente de cortocircuito (I_{sc})	8.40 A	8.40 A	0 %
Tensión de circuito abierto (V_{oc})	21.40 V	21.40 V	0 %
Voltaje en el punto de máxima potencia (V_{pmax})	18.00 V	17.76 V	1 %
Corriente en el punto de máxima potencia (I_{pmax})	7.50 A	7.69 A	-2.5 %
Punto de máxima potencia (MPPT)	135 W	136.5 W	-1.1 %

Tabla 1. Tabla de las curvas características I-V P-V

4. Convertidor Boost

Convertidor Boost

Los convertidores CC/CC son circuitos electrónicos de potencia que elevan o disminuyen el nivel de tensión de continua que reciben para poder ajustarse a las características de tensión en la aplicación pertinente.

Para regular este nivel de tensión a la salida del convertidor se utilizan controles, específicamente diseñados para cada aplicación, que modulan la anchura de pulso (PWM) que recibe un IGBT.

Existen varios tipos de convertidores, los más utilizados son el convertidor Buck o reductor de tensión y el convertidor Boost o elevador.

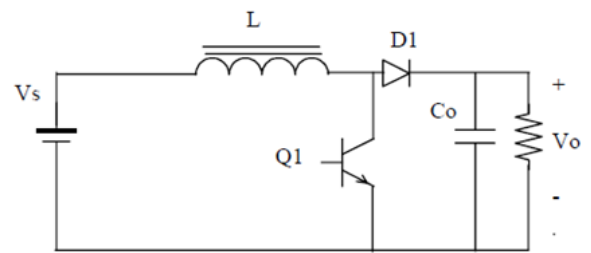


Fig. 4. Curvas características del Panel Fotovoltaico

Este último es con el que trabajaremos en nuestro sistema, ya que necesitaremos elevar la tensión de salida de nuestro panel fotovoltaico por encima de 311V si queremos poder transformarla para consumirla en casa o inyectarla en red.

Control

El control es una herramienta necesaria e indispensable para una correcta definición del ciclo de trabajo que vamos a querer en la puerta de los semiconductores que tengamos en el circuito.

En este proyecto en concreto, el diseño del controlador para el circuito elevador Boost, es esencial su correcto diseño para de esta forma conseguir la máxima eficiencia de los paneles solares situados como fuente de alimentación en el circuito.

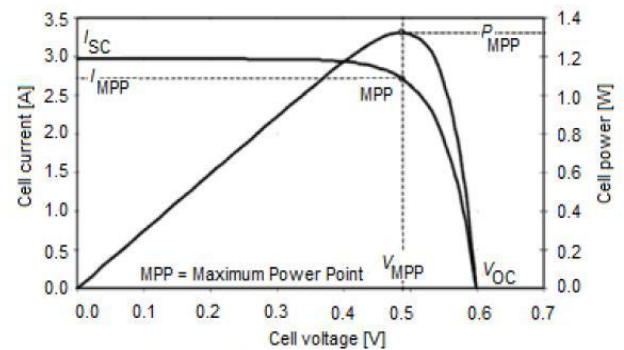


Fig. 5. Curvas características I-V P-V de un Panel Fotovoltaico

Los paneles solares por si solos no pueden trabajar en el Punto de Máxima Potencia ya que hay varias condiciones que le impiden poder hacerlo. La condición más importante de la que dependen los paneles es el clima.

Es por ello que el objetivo de nuestro control deberá basarse en poder entregar la máxima potencia que nos pueda dar para unas condiciones de radiación y temperatura determinadas.

En el siguiente diagrama de flujo, correspondiente a la figura 6, podemos analizar al completo de forma muy intuitiva como actúa el control MPPT al completo:

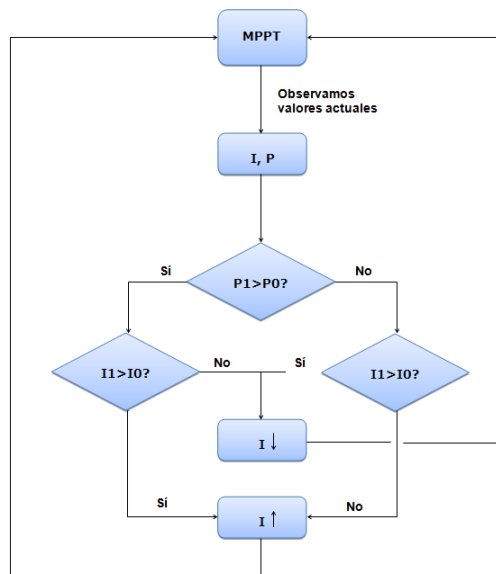


Fig. 6. Diagrama de flujo control Punto de Máxima Potencia P&O

Si disponemos todos los datos en una tabla podremos ver la evolución que sigue nuestro control:

Ipanel	Ppanel	XOR	Sentido	Nivel	Ton	Ipanel
0	0	0	Izquierda	Baja	Sube	Sube
0	1	1	Derecha	Sube	Baja	Baja
1	0	1	Derecha	Sube	Baja	Baja
1	1	0	Izquierda	Baja	Sube	Sube

Tabla. 2. Tabla de estados para el control del MPP

Inversor Monofásico

La función de un inversor es cambiar la energía eléctrica de entrada en forma de corriente continua, a una energía eléctrica de salida de corriente alterna, con valor eficaz y frecuencia correspondiente que este demandando la red en el instante determinado. En la aplicación a desarrollar el inversor se usa para convertir la corriente continua generada por unos paneles solares fotovoltaicos y poder ser consumida o inyectada a la red eléctrica.

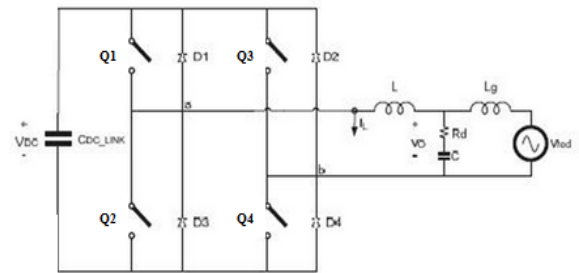


Fig. 7. Diagrama de flujo control Punto de Máxima Potencia P&O

Existen varios tipos de inversores pero en nuestro proyecto se ha escogido el inversor de puente completo, ya que permite mayor número de conmutaciones al tener cuatro interruptores y, por tanto, mayores posibilidades de control.

Control

Para la generación del control del inversor debemos separar el diseño en dos partes claramente diferenciadas, la primera es para la obtención de la constante de referencia que nos permitirá dar la amplitud adecuada a nuestra señal de referencia.

1) Obtención de la constante de referencia:

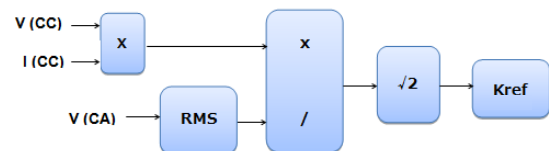


Fig. 8. Esquema obtención constante de referencia para el control

el resultado de multiplicar la tensión y la intensidad que proviene del boost, y que por tanto es continua y de al menos $220\sqrt{2}$ o lo que es lo mismo 311V, se obtiene la potencia de nuestro sistema. Esta se compara con la tensión del inversor, alterna y previamente filtrada para la obtención de su valor en continua. Esto es posible gracias a la conservación de la potencia en circuitos electrónicos.

$$P_{cc} = P_{ca} \rightarrow V_{cc} * I_{cc} = V_{ca} * I_{ca}$$

El resultado de esta comparación lo multiplicamos por $\sqrt{2}$ para poder trabajar con la constante en alterna.

2) En esta segunda parte es donde se envían los disparos para poder determinar el ciclo de trabajo de nuestros "interruptores". En primer lugar comparamos nuestra tensión en alterna del inversor y esta misma tensión pero con su valor de continua, lo que nos da como resultado una senoide de valor unitario pero que trabaja a la

frecuencia del inversor. Seguidamente le damos como amplitud el valor de la constante de referencia 'kref' y ya tenemos una señal de corriente de referencia que será comparada con la señal de corriente del inversor para realizar los disparos y así determinar el ciclo de trabajo de las ramas.

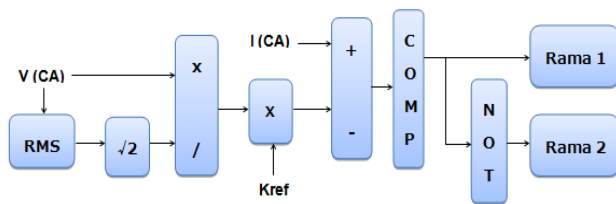


Fig. 9. Esquema control para la obtención del ciclo de trabajo

5. Simulaciones

En este apartado veremos el funcionamiento de nuestro sistema fotovoltaico completo, durante todo un día, de tal forma que nos permitirá ver el consumo energético que tiene nuestro hogar. Este provendrá de origen solar o de la red eléctrica convencional, según el momento del día y el consumo que tengamos.

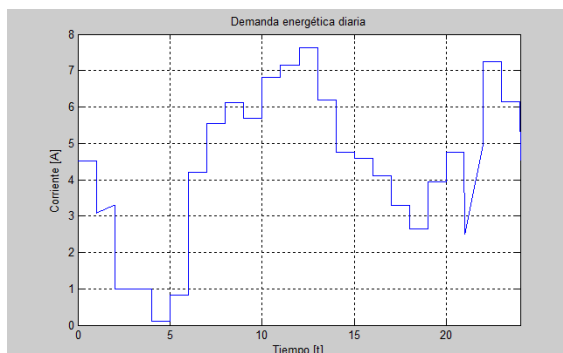


Fig. 10. Curva característica de consumo

Podemos comprobar, cómo cuando existe un consumo en el hogar y nuestros paneles no están produciendo energía o no poseen todavía la suficiente como para operar, existe de igual forma un consumo.

De esta forma nuestro sistema debe proporcionar dicha energía, en este caso, a través de la red eléctrica. Es por ello que como existe esa demanda 'Icasa' la red la corresponde enviando la corriente pertinente 'Ired' al hogar.

No es hasta entrados en horario solar, que nuestros paneles son capaces de producir la intensidad suficiente como para autoabastecer nuestras demandas energéticas y por tanto prescindir de las de la red eléctrica.

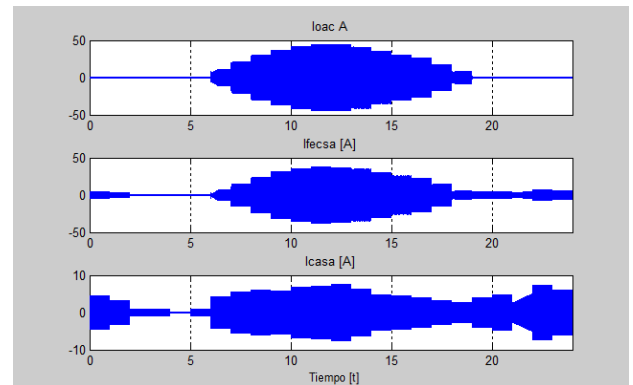


Fig. 11. Intensidades Inversor, Hogar y red eléctrica

Por último, pasamos a ver dos de las gráficas más significativas ya que dan sentido a nuestro proyecto y la instalación del sistema fotovoltaico.

En ellas se muestra en primer lugar la radiación solar que tenemos durante el día, en el caso del 21 de junio como es el día de mayor insolación de todo el año vemos como el Sol empieza a aparecer entre las 5-6:00am aunque nuestro sistema no es capaz de producir energía a través de ellos hasta las 6-7:00am. Es durante este rango horario cuando nuestro módulo de paneles empieza la producción de potencia.

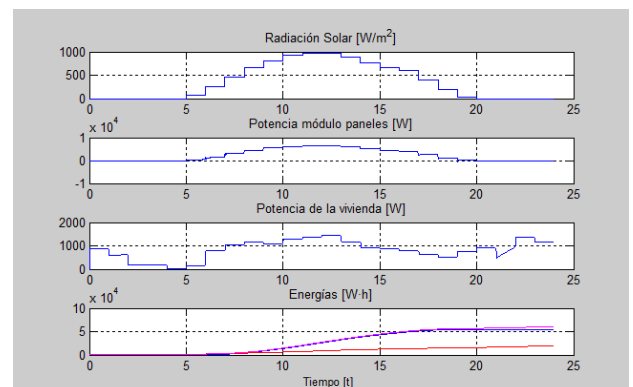


Fig. 12. Simulaciones completas

Seguidamente en la gráfica 14 se puede ver el desarrollo de nuestra producción y consumo de una forma más específica.

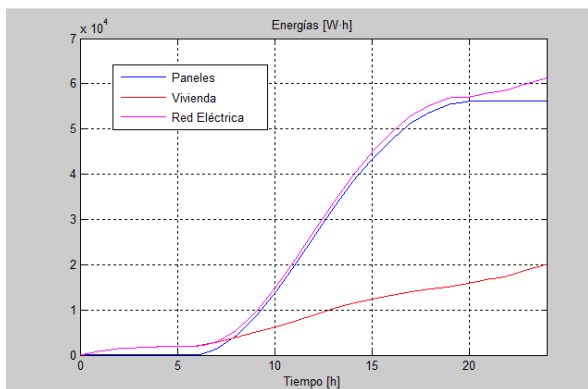


Fig. 13. Producción y consumo energético Paneles, Hogar y Red eléctrica

Como vemos el consumo en nuestra vivienda (señal roja) a lo largo del día no es de más de 20kWh y, excepto algunas horas concretas, este no se detiene a lo largo del día. Como hemos explicado más adelante nuestros paneles empiezan a trabajar sobre las 6-7 de la mañana, hora a la que en verano ya hay luz para producir la potencia necesaria. Pero hasta entonces es la red eléctrica (en rosa) la que se encarga de alimentar la demanda de nuestro hogar ajustándose de forma exhaustiva a la misma.

Distinto es cuando entra en juego el módulo de paneles del que disponemos, estos producen la energía según la disponibilidad de radiación solar, y por tanto si esta es alta ellos producirán una tasa energética elevada, a pesar de no ser necesitada en casa. Es por esta razón que nuestros paneles producen 54kWh, tan solo durante el horario solar (6am-19pm). Durante este período nuestro hogar tan solo demanda la mitad de su consumo total, 10kWh.

Aquí entra en juego el factor de cesión de la energía a red, y es que durante el horario solar del día 21 de junio, entre las 6am-19am venderemos aproximadamente unos 44kWh. Es por ello que en la gráfica de consumo la pendiente de la red eléctrica sube rápidamente ya que en ese momento está consumiendo la energía sobrante de nuestros paneles. Y no es hasta la noche que recupera su ritmo normal de abastecimiento al hogar auto ajustándose a la curva de nuestro consumo.

Ventajas del seguimiento

Un panel solar que se encuentre estático sobre su superficie no podrá aprovechar gran parte del recorrido solar de un día. Es por ello que tan solo recibirá una pequeña parte de la radiación disponible para ese día consiguiendo su plenitud en el momento en el que los rayos solares contacten con un ángulo cercano a los 90°.

Sin embargo no ocurre lo mismo para los paneles que disponen de seguimiento del recorrido solar, ya que son capaces de seguir al Sol para buscarla máxima eficiencia en la producción de energía. Dentro de los paneles con movimiento debemos diferenciar entre los de un eje y los de dos, siendo los primeros los encargados del seguimiento horizontal y los segundos, encargados además del vertical.

Los paneles de seguimiento a un eje son capaces de seguir el movimiento solar, pero no pueden adaptarse a la altura en la que se dispone el Sol, por tanto pierden eficiencia al no poder hacer una orientación adecuada. De esta forma sí que son capaces de aprovechar luz solar hasta el último momento porque buscan los amaneceres y atardeceres, sin embargo no consiguen un pico de potencia tan elevado como cabría esperar.

No ocurre lo mismo para los paneles con dos ejes de seguimiento, estos últimos son capaces de mantener en todo momento un ángulo de incidencia de 90° (aprox.) durante las 24h del día. Esto es debido a que pueden seguir tanto el movimiento del Sol respecto el horizonte como su movimiento vertical, pudiendo aprovechar la radiación durante las primeras horas de la tarde.

En la siguiente tabla se puede apreciar numéricamente los resultados arrojados por los distintos seguimientos respecto el módulo estático:

Condición de seguimiento	Energía [kW·h]	Incremento [kW·h]	Incremento [%]
Estático	54.00	-	-
Seguimiento a un eje	59.00	5.00	9.26 %
Seguimiento a dos ejes	70.00	16.00	29.62 %

Tabla. 3. Tabla comparativa resultados de seguimiento

Los resultados hablan por sí mismos, es evidente que los paneles que disponen de seguimiento solar son más eficientes que los que no lo incluyen. Sin embargo dentro de los que disponen de seguimiento, los de dos ejes son con diferencia mejores. Por tanto, sin duda merece la pena incluir un segundo eje para conseguir un modulo de paneles más eficiente.

6. Conclusiones

Las conclusión que se puede extraer del presente proyecto es que es posible simular y montar un sistema completo para generar energía eléctrica mediante módulos solares. Para de esta forma, subsanar parte del consumo de una vivienda mediante esta vía.

Si queremos generar mayor energía con nuestro módulo solar y, por tanto, ser más eficientes permitir que nuestros paneles dispongan de seguimiento solar es una buena idea. Y puestos a introducir capacidad de seguimiento lo ideal es dotar a nuestros paneles de dos ejes para así extraer la máxima potencia a lo largo del día.

Pero tanto si lo hacemos como si no, con las dimensiones y características de nuestro módulo solar, podremos alimentar nuestra vivienda a lo largo de todo el año. Incluso podremos vender parte de nuestra energía diaria a la red eléctrica ya que, durante las horas de luz, generaremos un exceso de energía que nos podrá reportar beneficios a lo largo del año.

7. Bibliografía y referencias

Webs

Anónimo. (4 de marzo 2013). *Wikipedia*. Recuperado el 21 de Febrero de 2014, de http://es.wikipedia.org/wiki/Convertidor_Boost

Universidad de Valencia. (16 noviembre 2011). *Universidad de Valencia*. Recuperado el 21 de Febrero de 2014, de <http://www.uv.es/~esanchis/sea/pdf/tema3-SEA-03.PDF>

Tapia, E. (3 septiembre 2006). *Universidad Católica de Valparaíso*. Recuperado el 21 de Febrero de 2014, de <http://lep.eie.pucv.cl/TesisColoro.pdf>

González, M. (12 septiembre 2009). *Con-Ciencias*. Recuperado el 21 de Febrero de 2014, de tecnura.udistrital.edu.co/ojs/index.php/revista/article.pdf

eduMedia. (20 de enero 2005). *eduMedia*. Recuperado el 21 de Febrero de 2014, de <http://www.edumedia-sciences.com/es/a574-convertidor-boost>

Eraeco.(15 de junio de 2010). *Eraeco*. Recuperado el 2 de Marzo de 2014, de http://www.eraeco.es/index.php?option=com_content&view=article&id=58&Itemid=63

Carbonell, A. (11 de octubre de 2009). *YouScribe*. Recuperado el 19 de Marzo de 2014, de <http://es.youscribe.com/catalogue/informes-y-tesis/conocimientos/ciencias-formales/convertidor-cc-cc-elevador-con-seguidor-de-punto-de-maxima-potencia-1904605>

MpptSolar. (26 de abril de 2008). *MpptSolar*. Recuperado el 3 de abril de 2014, de <http://www.mpptsolar.com/es/proyecto-fotovoltaica-aislada.html>

ENF. (13 de enero de 2014). *ENF*. Recuperado el 15 abril de 2014, de <http://www.enfsolar.com/pv/panel-datasheet/Monocrystalline/1898>

Referencias

España. Ley 24/2013, de 26 de diciembre, del Sector Eléctrico. *Boletín Oficial del Estado*, 27 de diciembre de 2013, núm. 310, pp. 105198-105294.

<http://www.boe.es/boe/dias/2013/12/27/pdfs/BOE-A-2013-13645.pdf>

Ortiz, E. (2006). Modeling and analysis of solar distributed generation. Disertación doctoral. Doctor of Philoshopy. Michigan State University. Estados Unidos.

Gil, O. (2008). Modelado y simulación de dispositivos fotovoltaicos. Tesis de Maestría. Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica. Universidad de Puerto Rico. San Juan.

Gerhard Volk. Septiembre 2001: <http://bzgserver.boku.ac.at/volk/radcalc1/index.htm>